Experimentaluntersuchungen

zur

Constitution permanenter Magnete.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer

hohen naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt

von

Eberhard Kempken
aus Wickrath.

ACAD.
LUGD BAT.
BIBL.

Tübingen
Druck und Verlag von Gg. Schnürlen
1906.

Von der Fakultät angenommen am 7. März 1906.

Meiner lieben Mutter.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552717_0078

Einleitung.

Die Frage, was bleibt in einem permanenten Magneten konstant, hat in den letzten Jahren mehrfache Bearbeitung gefunden. Jedoch sind die Resultate dieser Untersuchungen keineswegs übereinstimmend gewesen, und es herrscht noch keine Einheitlichkeit in der Beantwortung obiger Frage. Einige stehen auf dem Standpunkt, dass man einen permanenten Magneten als Sitz einer gewissen Anzahl von Kraftlinien anzusehen hat; andere behaupten, seine magnetomotorische Kraft wäre eine konstante. Neben den vorwiegend theoretischen Überlegungen von J. Busch [1]), F. Emde [2]), H. Weichsel [3]), R. Hiecke [4]), M. Korndörfer [5]), R. Gans und R. H. Weber [6]) haben H. Eichel [7]) und R. H. Weber [8]) das Thema ausschliesslich experimentell behandelt.

H. Eichel findet: „Für einen permanenten Magneten ist die Gesamtanzahl der vorhandenen Kraftlinien jederzeit unveränderlich; er ist daher als Sitz einer konstanten Kraftlinienzahl zu betrachten.“ Dieses Gesetz kann nicht als bewiesen angesehen werden; denn die benutzten Magnete waren bis zur Sättigung magnetisiert. Da nun bei der Sättigung die magnetische Leitfähigkeit des Stahls, seine Permeabilität sehr klein wird, so verlief eine wesentliche Anzahl Kraftlinien nicht inner-

1) J. Busch, Elektrotechnische Zeitschrift 22, p. 234, 1901 und l. c. 25, p. 118 und p. 309, 1904. 2) F. Emde, l. c. 24, p. 949, 1903. 3) H. Weichsel, l. c. p. 34, 1904. 4) R. Hiecke, l. c. p. 35 und p. 205. 5) M. Korndörfer, l. c. p. 101. 6) R. Gans und R. H. Weber, Drudes Annalen 16, p. 172, 1905. 7) H. Eichel, Hallenser Dissertation 1903. 8) R. H. Weber, Drudes Annalen 16, p. 178, 1905.

halb seines magnetischen Kreises, sondern divergierte in den Raum. Es lag also nicht annähernd ein magnetischer Kreis vor.

Das Resultat der R. H. Weber'schen Untersuchungen ist: „Wenn mit der Widerstandsänderung Feldänderungen von weniger als 15 Prozent verbunden sind, können wir die magnetomotorische Kraft mit einer wohl für alle Zwecke ausreichenden Genauigkeit als konstant ansehen." Dieses Resultat dürfte wohl richtig sein und wurde auch durch meine Untersuchungen bestätigt.

Um nun die Unsicherheit der Ansichten über die permanenten Magnete zu klären, unternahm ich es, auf gütige Anregung von Herrn Dr. Gans, der Frage, was bleibt in einem permanenten Magneten konstant, durch erneute und weitergehende Untersuchungen eine definitive Beantwortung zu geben.

Theoretische Überlegungen.

Denkt man sich in einem beliebigen Eisenstück eine Röhre, deren Mantel durch Kraftlinien gebildet wird, so bezeichnet man die Kraft, die auf einen Pol von der Stärke $+ 1$ im Innern dieser sogenannten Kraftröhre wirkt, als magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$. Die magnetische Induktion ist dann definiert durch die Gleichung

$$\mathfrak{B} = \mu \, . \, \mathfrak{H},$$

wo μ die Permeabilität ist. Nimmt man an, dass die Kraftröhre Medien von verschiedener Permeabilität durchsetzt, und bezeichnet man seine Querschnitte innerhalb der verschiedenen Medien mit q_1, q_2, q_3, . . . und die in den Querschnitten vorhandenen Feldstärken mit $\mathfrak{H}_1$, $\mathfrak{H}_2$, $\mathfrak{H}_3$ . . ., die Permeabilitäten mit μ_1, μ_2, μ_3 . . ., so ergibt sich

$$\mu_1 \, \mathfrak{H}_1 \, q_1 = \mu_2 \, \mathfrak{H}_2 \, q_2 = \mu_3 \, \mathfrak{H}_3 \, q_3 = \ldots = \mathfrak{B} \, . \, q$$

Für einen mit einem Spalt versehenen Magnetkreis ergibt sich daraus, da μ in Luft $= 1$ ist und die Querschnitte als gleich angenommen werden sollen:

1) $$\mathfrak{B} = \mu \, . \, \mathfrak{H}_i = \mathfrak{H}_a.$$

Der Index i gilt für die Stahlstrecke, und der Index a für den Luftspalt.

Die Arbeit, die geleistet wird, um einen Magnetpol + 1 in dem geschlossenen Magnetkreis herum zu führen ist:

2) $$\mathfrak{H}_i \cdot l_i + \mathfrak{H}_a \cdot l_a = \mathfrak{M} \cdot l_i,$$

wo $\mathfrak{M}$ die Magnetisierung oder das magnetomotorische Potentialgefälle bedeutet. Nach Gleichung 1) ist

$$\mathfrak{H}_i = \frac{\mu}{\mathfrak{H}_a}$$

Setzt man diesen Wert in Gleichung 2) ein, so bekommt man:

3) $$\mathfrak{H}_a = \frac{\mathfrak{M} \cdot l_i}{\frac{l_i}{\mu} + l_a}$$

Letztere Gleichung gilt für den Einheitsquerschnitt. Für einen beliebigen Querschnitt q des Kreises gilt:

4) $$\mathfrak{H}_a \cdot q = \frac{\mathfrak{M}\, l_i}{\frac{l_i}{\mu \cdot q} + \frac{l_a}{q}}$$

Man sieht, die im Nenner der rechten Seite stehenden Ausdrücke

$$\frac{l_i}{\mu \cdot q} \text{ und } \frac{l_a}{q}$$

entsprechen dem Ausdruck für den elektrischen Widerstand:

$$W = \frac{l}{q \cdot \gamma}$$

wo γ die spezifische Leitfähigkeit ist. Setzt man für obige Ausdrücke w_i resp. w_a und für $\mathfrak{M} \cdot l_i$ den Buchstaben M, so wird aus der Gleichung 4):

5) $$\mathfrak{H}_a \cdot q = \frac{M}{w_i + w_a}$$

Diese für den permanenten magnetischen Kreis gültige Gleichung 5) entspricht genau dem Ohm'schen Gesetz. Man

kann daher M als magnetomotorische Kraft des Kreises bezeichnen und sie schreiben:

$$\text{Kraftlinienstrom} = \frac{\text{Magnetomotorische Kraft}}{\text{Magnetischer Widerstand}}.$$

Es handelt sich darum, experimentell zu entscheiden, ob in Gleichung 5) die linke Seite, d. h. der Kraftlinienstrom oder der Zähler der rechten Seite, d. h. die magnetomotorische Kraft konstant ist. Ist M konstant, so muss bei variablem w_a und konstantem w_i, was zutrifft, so lange μ sich nicht ändert, $\mathfrak{H}_a$ sich verändern. Allerdings wird w_i nicht vollständig konstant, wegen seiner Variation mit $\mathfrak{H}$. Jedoch machte sich dies bei meinen experimentellen Untersuchungen nicht störend bemerkbar; denn seine Variation war nur eine sehr geringe. Im äusseren Feld hatte ich im Maximum eine Stärke von 1000 cm gr. sec Einheiten. Dem entspricht nach E. Gumlich und E. Schmidt[1]) im Innern eine Feldstärke von etwa 14 Einheiten bei einer Permeabilität von 70. Da das Feld um etwa 386 Prozent verkleinert wurde, sank die Feldstärke im Innern auf 3,8 Einheiten bei einer Permeabilität von 66. Die Permeabilitätsänderung von 70 auf 66 hat auf den absoluten Wert der Grösse $l_a + \frac{l_i}{\mu}$ wegen des hohen Wertes von l_a keinen grossen Einfluss.

E. Cohn[2]) gibt für einen mit einem Spalt versehenen magnetischen Kreis folgende Gleichungen an:

$$B = \mu \cdot \mathfrak{H}_i + J$$
$$\mathfrak{H}_i \cdot l_i + \mathfrak{H}_a \, l_a = 0.$$

Daraus ergibt sich nach einiger Umformung:

$$\mathfrak{H}_a = \frac{l_i \cdot \frac{J}{\mu}}{\frac{l_i}{\mu} + l_a}$$

---

1) E. Gumlich und E. Schmidt, Elektrotechn. Zeitschr. 22, p. 690. 1901. 2) E. Cohn, Das elektromagnetische Feld, p. 221, Leipzig 1900.

In der letzten Formel entspricht $l_i \cdot \frac{J}{\mu}$ der Grösse M der Gleichung 5). Cohn hält J für konstant, während die Versuche die Konstanz von $\frac{J}{\mu}$ ergeben.

Methode der Versuche.

Zu meinen Untersuchungen nahm ich halbkreisförmige, in Holzkohlefeuer gehärtete Werkzeugstahlstücke mit kreisförmigem Querschnitt. Die Stirnflächen waren plan geschliffen. Werden zwei solcher Stücke geschlossen und dann magnetisiert, so verlaufen die Magnetkraftlinien ausschliesslich im Innern des Stahls und bilden so einen vollständigen magnetischen Kreis. Wird nach der Magnetisierung der Kreis wieder geöffnet, so kann man in erster Annäherung immer noch von einem magnetischen Kreis sprechen, wenn man den Spalt nicht allzu gross macht; denn es verlaufen die Kraftlinien zum grössten Teil senkrecht von einer Stirnfläche zur andern. Die übrigen bilden die Streuung, die an den Stirnflächen am stärksten ist und nach den neutralen Zonen rapid abnimmt. Verengt oder erweitert man die Spalte, so kann man damit den magnetischen Widerstand des Kreises beliebig variieren. Es wurde bei den verschiedenen Spaltbreiten die jeweilige Kraftlinienanzahl, die Feldstärke, für einen gewissen Querschnitt gemessen, indem Drahtspulen, die mit einem ballistischen Galvanometer leitend verbunden waren, aus dem Bereich der Kraftlinien plötzlich entfernt wurden. Der dadurch in den Spulen induzierte Strom und damit auch der Galvanometerausschlag war proportional der Feldstärke. Wenn die magnetomotorische Kraft konstant sein soll, so müsste unter der Annahme, dass der innere Widerstand des Systems der gleiche bleibt, die Variation des äusseren, eine Variation der Kraftlinienanzahl ergeben.

Herstellung der Messspulen.

Da der magnetische Kreis möglichst vollständig sein sollte, so war ich gezwungen tunlichst mit schmalem Spalt zu arbeiten. Infolgedessen mussten die Messspulen recht dünn sein; und um grosse Effekte zu erhalten, mussten die Windungsflächen recht gross sein, also mussten die Spulen recht viele Lagen Draht haben. Ich benutzte 2 Grössen von Spulen. Die erste Sorte stellte ich folgendermassen her: An einem 8 mm dicken Messingstab wurde ein Dorn abgedreht von 5 mm Querschnitt und 2 mm Länge. Gegen den Ansatz hin war der Dorn etwas konisch, so dass eine Messingscheibe von 1 mm Dicke, 24 mm äusserem und 5 mm innerem Durchmesser an dem Ansatz fest aufgesetzt werden konnte. An den Dorn schloss sich ein zweiter an von 3 mm Dicke und 8 mm Länge, der an seinem Ansatz ebenfalls konisch gedreht war, so dass eine gleiche Messingscheibe von 3 mm innerem Durchmesser gleichfalls fest aufgesetzt werden konnte. Zwischen den 2 Messingplatten, die sich auf diese Weise in einem Abstand von 1 mm genau gegenüber standen, wurden die Spulen gewickelt, nachdem die Platten an den Ansatzstellen mit flüssigem Schellack verklebt waren. Als Spulendraht wählte ich mit Rohseide umsponnenen Kupferdraht von 0,1 mm Dicke. Der Messingstab wurde auf der Drehbank befestigt. Ein Drahtende und eine Anzahl Wickelungen um den Stab herum als spätere Zuleitung zur Spule, wurden auf dem Stab und der ersten Messingscheibe mit Schellack verklebt, und dann der Zwischenraum zwischen den beiden Messingplatten durch langsames Drehen der Drehbank vollgewickelt und zwar mit leichtem Zug an dem Draht, damit sich die einzelnen Windungen gut neben und aufeinander legten, und die Spule möglichst fest wurde. Im Ganzen wurden 250 Windungen aufgewickelt. Die zweite Zuleitung mit dem Ende wurde ähnlich wie die erste auf dem überstehenden Dornende aufgewickelt und verklebt. Daraufhin wurde das

Ganze in eine Schale mit heissem Paraffin gelegt und unter die Luftpumpe gebracht. Das heisse Paraffin brachte etwaige Feuchtigkeit in der Isolationsseide zur Verdampfung. Nach einer Weile wurde der Atmosphärendruck eingelassen, der in die Zwischenräume zwischen den Drahtwindungen das Paraffin hinein presste, so dass nach dem Erkalten des Paraffins eine ziemlich feste Spule entstanden war. Sie wurde von dem Dorn herunter genommen, und eine Messingplatte nach vorsichtiger Erwärmung durch seitlichen Zug entfernt. Daraufhin wurde sie in eine ringförmige, mit einem Stil versehene Fassung aus Hartgummi von 1 mm Dicke, worin sie gerade hinein passte, gelegt und mit Paraffin darin verklebt. Dann wurde die zweite Scheibe gleichfalls nach vorsichtiger Erwärmung durch seitlichen Zug entfernt.

Die zweite, kleinere Sorte von Spulen wurde ähnlich angefertigt; nur war die Wickelschablone, den geringeren Abmessungen der Spule entsprechend, eine andere. In die Stirnfläche eines Messingstabes wurde eine Messingschraube von 1 mm Durchmesser bis zum Ansatz des Gewindes eingeschroben. Der Ansatz war so lang, dass eine Messingscheibe, die noch darauf gesetzt war, noch 1 mm Zwischenraum zur Stirnfläche des Stabes liess. Die Scheibe hatte einen äusseren Durchmesser von 6 mm und war leicht gegen den Schraubenkopf befestigt. Die Wickelung geschah zwischen der Stirnfläche und der Scheibe, ähnlich wie bei den anderen Spulen. Es wurden 50 Windungen aufgewickelt. Vor dem Paraffinieren wurde die Hartgummifassung über die Scheibe herüber gedrückt, so dass während dieses Vorgangs die Spule schon in ihrer Fassung sass. Die Lösung von den Metallteilen geschah, indem die Schraube herausgedreht, dann die kleine Scheibe erwärmt und seitlich von der Fassung herunter gezogen wurde. Daraufhin wurde der Messingstab erwärmt und Fassung samt Spule seitlich von dem Stab herunter gezogen.

Die Messvorrichtung.

Die beiden Magnetstücke wurden nach der Magnetisierung je auf einen 20 cm hohen Holzblock fest so montiert, dass die ungleichnamigen Pole zusammen lagen. Die beiden Holzblöcke waren auf einem Drehbanksupport so befestigt, dass Umdrehungen der Supportspindel die Verschiebung eines Blockes ergaben, und so die Polflächen von einander entfernt wurden. Die Blöcke mussten diese Höhe von 20 cm haben, um das störende Eisen des Supports weit genug von den Magnetstücken zu entfernen. Den genauen Berührungspunkt der Polflächen stellte ich mittels eines elektrischen Stromkreises, in den die beiden Magnetstücke eingeschlossen waren, fest. Die Stellung, wo die Polflächen sich trennten, zeigte ein Galvanoskop dadurch an, dass kein Ausschlag erfolgte. Die Grösse der Verschiebung der Blöcke und damit die Breite der Spalte wurde zuerst an einer Trommelteilung, die an der Spindel befestigt war, abgelesen. Diese Vorrichtung wurde wegen der Ungenauigkeit der Ablesung infolge des toten Ganges der Spindel ersetzt durch eine auf dem beweglichen Block befestigte, mit genauer Teilung versehenen Glasskala. Diese beobachtete ich durch ein auf dem festen Block montiertes Fadenkreuzmikroskop und konnte so Verschiebungen von 0,1 mm genau ablesen, solche von 0,01 mm noch schätzen. Die Skala wurde durch eine unter ihr angebrachte Liliputglühlichtbirne einer Taschenlaterne beleuchtet.

An den beiden Enden eines ungleicharmigen Hebels, dessen Achse, damit sie in ihren Lagern nicht wackelte, sehr sorgfältig gearbeitet war, wurden je eine von den Spulen mit dem Stil der Fassung befestigt. Der Hebel, aus Messing gefertigt, war mit einer dicken Schicht Schellack überzogen, und so waren etwaige Isolationsfehler bei den Zuleitungsdrähten der Spulen unschädlich gemacht. Die Zuleitungsdrähte wurden auf dem Hebel mit Schellack verklebt

bis zur Hebelachse und von dort zu dem Galvanometer weiter geleitet. Der Hebel selbst war an dem unbeweglichen Block durch ein Winkelmessingstück so befestigt, dass die eine Spule, die Messspule, gerade in einem Spalt mitten vor einer Polfläche, an der sie sich gerade vorbei bewegen konnte, durch eine Feder festgehalten, ruhte. Der Abstand der Messspule betrug 15 cm von der Hebelachse, der der Hülfsspule 18 cm. Die Hebelungleichheit war eingerichtet, damit das Übergewicht des einen Armes, nach Lösen der Feder, die Spulen aus dem Spalt herausschlagen liess. Wenn die Spule aus dem Spalt bis zu ihrer Ruhelage herausgefallen war, wo der Hebel ebenfalls durch eine Feder festgehalten wurde, war sie der Einwirkung des Magnetfeldes vollkommen entrückt, auch bei der grössten Streuung, wie eine dahin zielende Untersuchung gezeigt hat. Mit der zweiten Spule sollte die Differenz des Hauptfeldes und des Feldes eines Elektromagneten von gleichen Dimensionen wie die permanenten Magnetstücke gemessen werden, für den Fall, dass die aus dem Hauptfeld allein herausfallende Spule einen wegen seiner Grösse unablesbaren Galvanometerausschlag ergab. Die Spulen waren hinter einander geschaltet; jedoch konnte die Hauptspule auch allein benutzt werden.

Als Messinstrument benutzte ich ein astatisches Du Bois-Rubens'sches Galvanometer mit schwerem Magnetsystem, dessen Schwingungsdauer bei offenem Kreis 12 Sekunden betrug. Die vier Galvanometerrollen zu 20 Ohm wurden paarweise hinter und neben einander geschaltet. Mit der Aufstellung hatte ich anfänglich Schwierigkeiten, in sofern als die Ausschläge, namentlich wenn sie 100 Skalenteile überschritten, bei gleichen Impulsen nach links und nach rechts nicht gleich blieben, sogar manchmal bis zu 30 Prozent von einander abwichen. Dieses änderte sich erst, und es trat vollständige Übereinstimmung der Ausschläge nach links und nach rechts ein, als das Galvanometer auf einer in die Wand eingelassenen Sandsteinplatte so aufgestellt war, dass die beiden Magnetsysteme genau im

magnetischen Meridian standen. Ausserdem zeigte es sich, dass die ballistischen Ausschläge des Galvanometers keineswegs proportional mit den Grössen der Impulse waren. Dass dieses bei ballistischen Galvanometern auftreten kann, führt K. Schering [1]) auf ungleiche Dämpfung und Inkonstanz des Drehungsmomentes zurück. Es war daher bei den Ausschlägen, welche das Galvanometer zeigte, eine Correktion anzubringen; es musste geaicht werden. Dies geschah auf folgende Weise: In einer ganz eisenfreien Kupferdrahtspule wurde eine ebenfalls eisenfreie Kupferdrahtspule unverschiebbar gegen diese befestigt. Die innere sekundäre Spule war mit dem Galvanometer leitend verbunden. Durch die Primärspule wurden exakt durch Widerstände gemessene Ströme geschickt. Das Ein- und Ausschalten dieser Ströme induzierte in der Sekundärspule Impulse, die den jeweils induzierenden Strömen proportional waren, und es zeigte sich, dass an den Galvanometerausschlägen Correktionen nach folgender Tabelle anzubringen waren, damit die Proportionalität der Ausschläge mit den Impulsen hergestellt wurde.

Ausschlag	Corr.	Ausschlag	Corr.	Ausschlag	Corr.
370,5	35,9	259,0	9,5	179,0	2,4
345,5	25,6	243,0	8,2	168,0	2,0
338,0	23,1	231,5	6,2	158,0	1,6
324,0	19,5	226,3	5,3	146,0	1,3
316,0	18,2	219,5	4,8	138,7	1,1
303,7	16,0	211,0	4,4	121,0	0,8
295,0	14,3	209,0	4,3	109,5	0,6
286,0	13,1	198,3	3,0	101,0	0,4
275,5	11,6	190,0	2,7	91,5	0,2
263,5	10,1	182,0	2,5	83,8	0,1

Die angegebenen Feldstärken in Einheiten des cm. gr. sec. Systems wurden bestimmt durch Vergleichung der Felder mit

1) K. Schering. Wied. Annalen 9. pag. 452. 1880.

einem bekannten Feld, dessen Stärke mit dem PASCHEN'schen Differentialinduktor[1]) exakt gemessen war.

Vorversuche.

Als Magnetstück, auf dem unbeweglichen Block montiert, nahm ich einen Stahlhalbring, dessen mittlerer Durchmesser 16 cm betrug. Der Durchmesser seines Querschnittes war 2,5 cm. Ihm gegenüber, auf dem beweglichen Block, wurde ein Weicheisenhalbring von gleichen Dimensionen angebracht. Vor der Montage war der Stahlhalbring magnetisiert worden, als er durch den Weicheisenhalbring geschlossen war. Der Elektromagnet des Compensationsfeldes hatte die gleichen Dimensionen wie das permanente Magnetsystem und sein Spalt betrug 0,5 mm. Die beiden Felder wurden soweit abgeglichen, dass der Ausschlag des Galvanometers, wenn die Spulen aus den Feldern herausfielen, 4 Skalenteile betrug. Dabei war das Ausgleichsfeld das stärkere. Bei Beginn der Untersuchungen, als die Magnethalbringe 80 Trommelteile von einander entfernt waren, also bei der geringsten Spaltbreite betrug die absolute Feldstärke im Messspalt 48,7 Einheiten.

Tabelle 1.

	l	α beob.	α ber.	Differenz	Fehler in Proz.	Feldänd. in Proz.
a	0	126,0	126,0	0,0	0,0	42
b	5	122,0	121,0	— 1,0	— 0,8	37
c	10	117,5	116,4	— 1,1	— 0,9	31
d	15	113,0	112,1	— 0,9	— 0,7	27
e	20	108,1	108,1	0,0	0,0	22
f	25	103,5	104,2	+ 0,7	+ 0,7	17
g	30	100,7	100,8	+ 0,1	+ 0,1	13
h	35	97,5	97,5	0,0	0,0	9
i	40	94,5	94,5	0,0	0,0	7
k	45	91,9	91,6	— 0,3	— 0,3	3
l	50	88,8	88,9	+ 0,1	+ 0,1	0

1) F. PASCHEN, Physikalische Zeitschrift 6, p. 371. 1905.

l bedeutet die Vergrösserung des Spaltes von der ersten Beobachtungsstelle gerechnet in Trommelteilen. Die Grössen α sind die Mittelwerte aus jedesmal 10 Ausschlägen, die im grossen und ganzen nur wenig von einander abweichen. Aus den Beobachtungen a und e wurden die Konstanten der Gleichungen

$$\alpha = \frac{C}{a + l} \text{ und}$$

$$\alpha_{,} = \frac{C}{a + l_{,}}$$

die der Gleichung 5) entsprechen, ausgerechnet. Es ist C proportional mit M und a mit w_i. Die numerischen Werte für die Konstanten sind:

$$C = 15132{,}6 \qquad a = 40{,}1.$$

Mit Hilfe dieser so gewonnenen Grössen wurden die bei den jeweiligen Spaltbreiten mit der Kraftlinienzahl $\mathfrak{H}_a$ proportionalen Ausschläge α_b, α_c, α_d . . . . berechnet. Man sieht, dass die auf diese Weise erhaltenen Werte den beobachteten sehr nahe kamen und im Maximum nur 0,9 Prozent von ihnen abwichen. Bei den obigen Berechnungen war die Annahme zu Grunde gelegt, dass bei den Feldänderungen zwischen den Beobachtungen a und e die Grösse a konstant bliebe. Die Resultate ergeben die Richtigkeit dieser Annahme und es zeigt sich ausserdem, dass a nicht nur konstant ist für den Beobachtungsbereich zwischen a und e, sondern noch darüber hinaus bis zur Beobachtung l. Die Feldänderung von a bis l betrug 42 Prozent.

Eine weitere Beobachtungsreihe lieferte mir die Tabelle 2. Die Magnetisierung war die gleiche wie bei den Beobachtungen der Tabelle 1. Die Buchstaben haben die Bedeutung wie vorhin. Die Grössen α waren wieder die Mittelwerte aus 10 Beobachtungen, die wenig Abweichung von einander zeigten. Die Ausrechnung der Konstanten geschah aus den Beobachtungen a und l und lieferte:

$$C = 15145 \text{ und } a = 40{,}2.$$

Tabelle 2.

	l	α beob.	α ber.	Differenz	Fehler in Proz.	Feldänd. in Proz.
a	0	126,0	126,0	0,0	0,0	42
b	5	121,5	121,0	— 0,5	— 0,4	37
c	10	117,2	116,4	— 0,8	— 0,7	31
d	15	112,5	102,1	— 0,4	— 0,3	27
e	20	118,2	108,1	— 0,1	— 0,1	22
f	25	104,0	104,3	+ 0,3	+ 0,3	17
g	30	101,0	100,9	— 0,1	— 0,1	13
h	35	97,8	97,6	— 0,2	— 0,2	9
i	40	94,7	94,5	— 0,2	— 0,2	7
k	45	92,0	91,7	— 0,3	— 0,3	3
l	50	89,0	89,0	0,0	0,0	0

Die Abweichungen der beobachteten von den berechneten Ausschlägen ist wesentlich geringer, als bei der Beobachtungsreihe 1. Der grösste Fehler beträgt 0,7 Prozent. Die Konstanten stimmen mit den vorigen gut überein. Die Feldänderung betrug ebenfalls 42 Prozent.

Die beiden Beobachtungsreihen liefern den Beweis dafür, dass bei schwacher Magnetisierung die magnetomotorische Kraft konstant bleibt bei einer Feldänderung, infolge Vergrösserung des magnetischen Widerstandes, von 42 Prozent.

Die folgenden Untersuchungen wurden angestellt zur Prüfung des Gesetzes von der Konstanz der magnetomotorischen Kraft bei höherer Magnetisierung. Es wurde das gleiche, nur stärker magnetisierte Stahlstück benutzt wie bei den Beobachtungen 1 und 2. Die Spaltbreiten wurden in Teilen der Glasskala gemessen. Jeder Skalenteil betrug 0,2 mm. Die erste Beobachtung wurde gemacht bei einer Spaltbreite von 12 Skalenteilen.

Tabelle 3.

	l	α beob.	α ber.	Differenz	Fehler in Proz.	Feldänd. in Proz.
a	0	1948	1948	0,0	0,0	18
b	1	1870,5	1865,5	+ 5,0	+ 0,25	13
c	2	1790	1790	0,0	0,0	8
d	3	1725	1720,3	+ 4,7	+ 0,25	4
e	4	1656	1656	0,0	0,0	0,0

Die Feldstärke war im Messspalt bei der Beobachtung a 752 absolute Einheiten. Die Konstanten wurden aus den Beobachtungen a und e berechnet und es ergaben sich für

$$C = 44213 \text{ und für } a = 10{,}7.$$

Der Wert für α stimmt nicht mit den Werten von α aus den Beobachtungsreihen 1 und 2 überein, weil er nicht mehr in Trommelteilen, sondern in Teilen der Glasskala gemessen war. Die Feldänderung betrug bei der Messreihe 18 Prozent.

Die folgende Beobachtungsreihe wurde bei einer mittleren Magnetisierung gemacht.

Tabelle 4.

	l	α beob.	α ber.	Differenz	Fehler in Proz.	Feldänd. in Proz.
a	0	980,0	980,0	0	0,0	51
b	1	938,4	937,4	— 1,0	— 0,1	46
c	2	898,5	898,3	— 0,2	— 0,02	36
d	3	868,2	862,4	— 7,8	— 0,2	30
e	4	835,4	829,2	— 6,2	— 0,7	25
f	5	804,2	798,5	— 5,7	— 0,7	21
g	6	771,7	770,0	— 1,7	— 0,2	17
h	7	750,7	743,5	— 7,2	— 0,9	13
i	8	722,7	718,8	— 3,9	— 0,5	9
k	9	700,7	695,5	— 5,2	— 0,7	6
l	10	679,7	673,9	— 5,8	— 0,8	3
m	11	658,0	658,0	0,0	— 0,0	0

Die Werte für α sind Mittelwerte aus zwei Beobachtungsreihen, die gewonnen wurden, die erste bei Spaltvergrösserungen, die andere bei Spaltverkleinerungen. Das Feld war im

Messspalt 378 absolute Einheiten stark, bei der Beobachtung a. Die Feldänderung betrug von a bis m 51 Prozent. Die Konstanten, aus den Beobachtungen a und m berechnet, waren:

$$C = 22560 \text{ und } a = 11{,}0.$$

Der Wert für a stimmt mit dem der Tabelle 3 genügend überein.

Hauptversuche.

Da ich mit den klein dimensionierten Magnetstücken und den grossen Spulen die Konstanz der magnetomotorischen Kraft nur bis zu 51 Prozent Feldänderung beweisen konnte, weil ich wegen der zunehmenden Streuung den Spalt nicht vergrössern wollte, ging ich dazu über, die Anordnung so einzurichten, dass ich, unbeschadet der Streuung die Spaltänderung in weiteren Grenzen vornehmen konnte. Nach H. Lehmann[1]) ist bei geschlitzten magnetisierten Ringen die Streuung eine Funktion der relativen Schlitzweite; so bezeichnet er das Verhältnis $\frac{l}{r}$. Demnach musste ich den Magnetstücken einen recht grossen Querschnitt geben. Da nun ein magnetisches Feld von kreisförmigem Querschnitt in der Mitte am längsten homogen bleibt, weil die Kraftlinien dort senkrecht aus den Polflächen heraustreten, musste die Messspule in der Mitte direkt vor einer Polfläche stehen und dabei selbst recht klein sein. Ich nahm daher zu diesen Messungen die kleinere Sorte von Spulen, welche 5,14 Ω Widerstand und 0,6 cm Durchmesser hatten. Die Magnetstücke waren zwei Werkzeugstahlhalbringe von 17 cm mittlerem Durchmesser. Der Durchmesser des Querschnittes betrug 5 cm. Sie waren zusammen geschlossen magnetisiert worden. Das Kompensationsfeld brauchte nicht benutzt zu werden, da das Messfeld allein schon ablesbare Ausschläge erzeugte. Die Galvanometerspulen waren alle hinter einander geschaltet.

1) H. Lehmann, Wied. Annalen 48, p. 409, 1893.

Tabelle 5.

	l	α beob.	α berechn.	Differenz	Fehler in Proz.	Feldänd. in Proz.
a	0	361,1	360,8	+ 0,3	+ 0,08	188
b	16	265,2	266,9	— 1,7	— 0,7	113
c	32	211,2	211,8	— 0,6	— 03,	68
d	48	175,2	175,5	— 0,3	— 0,2	40
e	64	151,4	149,9	+ 2,5	+ 1,6	21
f	80	132,9	130,8	+ 2,1	+ 1,6	6
g	90	124,8	122,2	+ 2,6	+ 2	0

Zu Beginn der Untersuchungen war die Spaltbreite 1,75 mm und die Feldstärke im Messspalt 939 absolute Einheiten. Bei dieser Beobachtungsreihe wurden aus den beiden Beobachtungen a und d, zwischen welchen eine Feldänderung von ca. 50 Prozent stattgefunden hatte, demnach die magnetomotorische Kraft als konstant bewiesen ist, die Konstanten ausgerechnet und die Werte für α bestimmt. Diese wurden dann nach der Methode der kleinsten Quadrate umgerechnet, und es ergab sich für die gleichfalls umgerechneten Konstanten

$$C = 16415 \text{ und } a = 28{,}0.$$

Die berechneten Werte für α stimmen nicht alle gut mit den beobachteten überein. Zwischen a und d, also bei einer Feldänderung von 175,2 auf 361,1, etwa 105 Prozent ist die Übereinstimmung eine genügende. Die letzten Werte für a von e bis g, weichen mehr als 1 Prozent ab, überschreiten damit mögliche Beobachtungsfehler. Im Ganzen fand eine Feldänderung von 188 Prozent statt. Es scheint also bei Feldänderungen von mehr als 105 Prozent das Gesetz von der magnetomotorischen Kraft nicht exakt zu stimmen. Um die Stelle festzulegen, wo die Abweichungen beginnen, und zu sehen, ob die obigen Fehler systematischer Natur sind oder auf Beobachtungsungenauigkeiten zurückzuführen sind, machte ich die folgende Beobachtungsreihe mit kleinen Spaltveränderungen.

Tabelle 6.

	l	α beob.	α berechn.	Differenz	Fehler in Proz.	Feldänd. in Proz.
a	0	361,6	362,5	— 0,9	— 0,3	188
b	4	334,2	333,3	+ 0,9	+ 0,3	170
c	8	309,2	308,5	+ 0,8	+ 0,3	154
d	12	287,1	287,1	0,0	0,0	137
e	16	268,5	268,5	0,0	0,0	123
f	20	252,2	252,2	0,0	0,0	103
g	24	237,7	237,7	0,0	0,0	96
h	28	224,3	224,7	— 0,4	— 0,2	83
i	32	213,3	213,2	+ 0,1	0,0	76
k	36	201,7	202,8	— 1,1	— 0,5	68
l	40	192,7	193,3	— 0,6	— 0,3	60
m	44	184,5	184,7	— 0,2	— 0,1	52
n	48	177,3	176,8	+ 0,5	+ 0,3	46
o	52	170,0	169,6	+ 0,4	+ 0,3	40
p	56	163,7	162,9	+ 0,8	+ 0,5	34
q	60	157,8	156,8	+ 1,0	+ 0,6	28
r	64	152,5	151,0	+ 1,5	+ 1,0	24
s	68	147,0	145,7	+ 1,3	+ 1,0	19
t	72	142,2	140,8	+ 1,4	+ 1,0	15
u	76	137,5	136,2	+ 1,3	+ 1,0	10
v	80	134,0	131,8	+ 1,8	+ 1,4	8
w	84	129,9	127,7	+ 2,2	+ 1,7	3
x	88	126,8	123,9	+ 2,9	+ 2,2	1,5
y	92	124,8	121,4	+ 3,4	+ 3,2	0

Die erste Beobachtung a wurde bei 1,75 mm Spaltbreite gemacht, bei einer Stärke im Messgehalt von 939 absoluten Einheiten. Die Konstanten wurden aus a und g bestimmt, und die Werte für α von a bis g ausgerechnet. Dann wurden aus diesen nach der Methode der kleinsten Quadrate die Konstanten korrigiert und sämtliche α daraus berechnet. Die Konstanten waren: $C = 16566$ und $a = 28{,}2$.

Diese beiden Werte stimmen mit den Konstanten der Tabelle 5 gut überein. Die berechneten Werte für α stimmen mit den beobachteten genügend überein für den Bereich von a bis u, dem eine Feldänderung von 136,2 auf 362,5, also

etwa 166 Prozent, entspricht. Dann tritt die in der Tabelle 5 schon konstatierte Abweichung wieder ein. Es beginnt demnach hier eine systematische Abweichung von dem Gesetz von der Konstanz der magnetomotorischen Kraft. Im Ganzen wurde das Feld um 188 Prozent geändert.

Um zu sehen, wie die Abweichungen sich verhalten, wenn man den Spalt noch mehr vergrössert, wurde eine weitere Beobachtungsreihe gemacht.

Tabelle 7.

	l	α beob.	α berechn.	Differenz	Fehler in Proz.	Feldänd. in Proz.
a	0	359,8	360,2	— 0,3	— 0,1	386
b	16	265,3	267,7	— 2,4	— 0,9	238
c	32	211,0	212,6	— 1,6	— 0,8	185
d	48	175,7	176,5	— 0,8	— 0,6	137
e	64	150,4	150,8	— 0,4	— 0,3	103
f	80	133,0	131,7	+ 1,3	+ 1,0	80
g	96	118,7	116,9	+ 1,8	+ 1,5	60
h	112	107,5	105,0	+ 2,5	+ 2,4	41
i	128	97,3	95,4	+ 1,8	+ 1,8	31
k	144	90,1	87,4	+ 2,5	+ 2,7	22
l	160	84,5	80,6	+ 3,9	+ 4,1	14
m	176	78,5	74,8	+ 3,7	+ 4,7	6
n	192	74,0	69,7	+ 4,3	+ 5,7	0

Die Feldstärke war bei a im 1,80 mm breiten Messspalt 936 absolute Einheiten. Die Werte für α wurden berechnet ähnlich wie bei Tabelle 6. Für die Konstanten ergab sich:

$$C = 16607 \text{ und } a = 28{,}1.$$

Diese Werte stimmen mit denen der beiden vorigen Tabellen genügend überein. Für den Bereich der Beobachtungen von a bis f stimmen die berechneten mit den beobachteten Werten für α überein. Es entspricht diesem Bereich eine Feldänderung von 133,0 auf 359,8, also etwa 171 Prozent. Dann setzen wieder die Abweichungen ein, und zwar werden sie mit breiter werdendem Spalt immer grösser. Es fand während der ganzen Beobachtungsreihe eine Feldänderung von 386 Prozent statt.

Für die Abweichungen, die nach Feldänderungen von etwa 170 Prozent anfangen, die möglichen Beobachtungsfehler zu überschreiten, gibt es zwei Erklärungen. Entweder gilt das Gesetz von der Konstanz der magnetomotorischen Kraft nicht streng, dann müsste sich die Kraftlinienanzahl einem konstanten Grenzwert nähern; dieses ist nicht zu beobachten. Oder die gemachten Spaltveränderungen sind nicht genau proportional den Änderungen des äusseren Widerstandes. Letzteres dürfte wohl der Fall sein. Jede einzelne Kraftlinie für sich hat zwar nach einer Spaltvergrösserung eine längere Luftstrecke zurückzulegen, demnach also grösseren Widerstand zu überwinden. Aber es tritt dann auch für die Gesamtheit der Kraftlinien infolge der Streuung eine Ausbuchtung der Kraftlinien ein. Dadurch wird der zu durchsetzende Querschnitt vergrössert und demnach der ganze Widerstand verkleinert nach der Formel:

$$W = \frac{l}{\mu \cdot q}.$$

Wenn die so entstehende Widerstandsverringerung gegenüber der durch die Spaltänderung hergestellten Widerstandsvergrösserung Einfluss gewinnt, treten die Abweichungen auf und zwar in dem Sinne, dass die Galvanometerausschläge zu gross werden, was eben mit einem verkleinerten Widerstand des magnetischen Kreises übereinstimmt.

Es gilt also das Gesetz von der Konstanz der magnetomotorischen Kraft wahrscheinlich noch über 170 Prozent Feldänderung hinaus; es liess sich nur mit der vorhandenen Versuchsanordnung nicht mehr beweisen. Eine Methode, die magnetischen Widerstände genau zu bestimmen, würde das Mittel in die Hand geben, das Gesetz in weiteren Grenzen zu prüfen.

Um mich zu vergewissern, dass bei allen vorigen Untersuchungen die Abnahme der Kraftlinienzahl nicht auf Zunahme der Streuung zurückgeführt werden kann, dass im Gegenteil auf keinen Fall der Kraftlinienfluss konstant ist, was H. Eichel für gesättigte Magnete behauptet, stellte ich den folgenden

Versuch an. Die sehr stark magnetisierten Stahlstücke wurden in einer Distanz von 5,4 mm gegenüber gestellt. Eine einzige Windung, auf einer Hartgummischeibe von 110 mm Durchmesser montiert, war mit dem Galvanometer, dem 10 Ω Widerstand vorgeschaltet waren, leitend verbunden. Wenn sie in dem Spalt aufgestellt war, umfasste sie dort sämtliche Kraftlinien, auch die gestreuten, denn leichtes Steigen und Verschieben der Windungsfläche ergab keinen Ausschlag. Sie wurde plötzlich durch den Spalt durchgezogen, wobei der Galvanometerausschlag 253 betrug. Das Gleiche geschah bei einer Spaltbreite von 3,2 mm; das Galvanometer zeigte 301 Skalenteile an. Es war also bei einer Verkleinerung der Spalte von 5,4 mm auf 3,2 mm eine Vergrösserung der Gesamtkraftlinienzahl im Verhältnis von 253 zu 301 erfolgt. Eine einzige Windung in der neutralen Zone lieferte bei plötzlicher Spaltverkleinerung von 5,4 mm auf 3,2 mm 48 Skalenteile, genau in Übereinstimmung mit der Differenz der beiden obigen Ausschläge.

Hysteresisuntersuchungen.

Man kann vermuten, dass nach Widerstandsänderungen im magnetischen Kreis eine Hysteresis sich bemerkbar macht. Wenn Hysteresis vorhanden ist, so wird eine Feldabnahme nachweisbar sein, wenn man zuerst den magnetischen Widerstand erhöht und dann auf den alten Betrag wieder vermindert. In der Tat habe ich eine solche Feldabnahme, wenn auch nur eine geringe, feststellen können.

Tabelle 8.

	l	α_1	α_2	Differenz
a	0	113,2	111,5	1,7
b	5	108,1	106,1	2,0
c	10	103,5	103,1	0,4
d	15	100,7	100,5	0,2
e	20	97,5	96,5	1.0
f	25	94,5	93,7	0,8
g	30	91,9	91,9	0

Diese Beobachtungen wurden mit dem kleinen Magnetsystem gemacht. Die Magnetisierung ist etwa die der Tabelle 1. Die Verschiebungen l sind in $\frac{1}{10}$ Trommelteilen gemessen. Die Werte für α_1 wurden gewonnen bei Widerstandsvergrösserung, die von α_2 bei Widerstandsverkleinerung. Die Werte für α_1 und α_2 weichen zwar wenig von einander ab; aber immer in dem Sinne, dass die Werte für α_2 die kleineren sind. Das Feld ist also bei der Widerstandsverkleinerung zurückgeblieben.

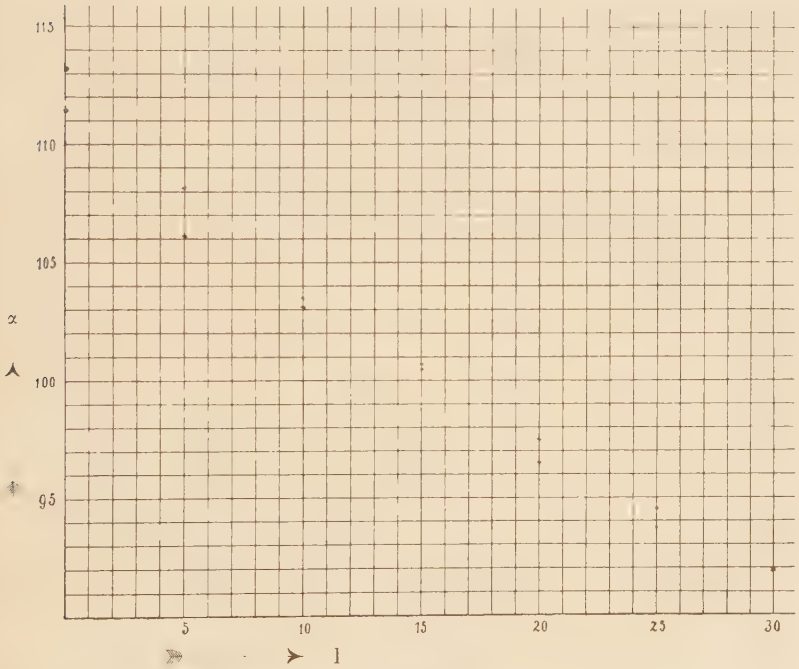


Tabelle 9.

	l	α_1	α_2	Differenz
a	11	39,0	50,4	11,4
b	12	81,0	91,5	10,5
c	13	124,5	136,0	11,5
d	14	148,0	163,0	15,0
e	15	184,7	192,0	7,3
f	16	207,7	224,3	16,6

	l	α_1	α_2	Differenz
g	17	238,2	251,0	12,8
h	18	261,0	268,5	7,5
i	19	286,4	291,0	4,6
k	20	306,5	308,7	2,2
l	21	325,7	326,0	0,3
m	22	341,5	341,5	0

Diese Beobachtungen wurden ebenfalls mit den kleinen Magnetstücken angestellt. Die Magnetisierung war etwa die der Tabelle 3 und 4. Die Werte für α_1 und α_2 wurden gewonnen wie bei Tabelle 8. Die Werte für α_2 sind die grösseren, entgegen denen der Tabelle 8. Es war eben das Compensationsfeld mit benutzt worden und dieses war das stärkere. Da die obigen Werte α_1 und α_2 die Differenzen des Hauptfeldes gegen das Compensationsfeld angeben, sind also in Wirklichkeit die Ausschläge, die bei den Widerstandsvergrösserungen gewonnen wurden, die grösseren. Es zeigt sich bei diesen Beobachtungen die Herysteresis in weit höherem Masse wie bei denen der Tabelle 8.

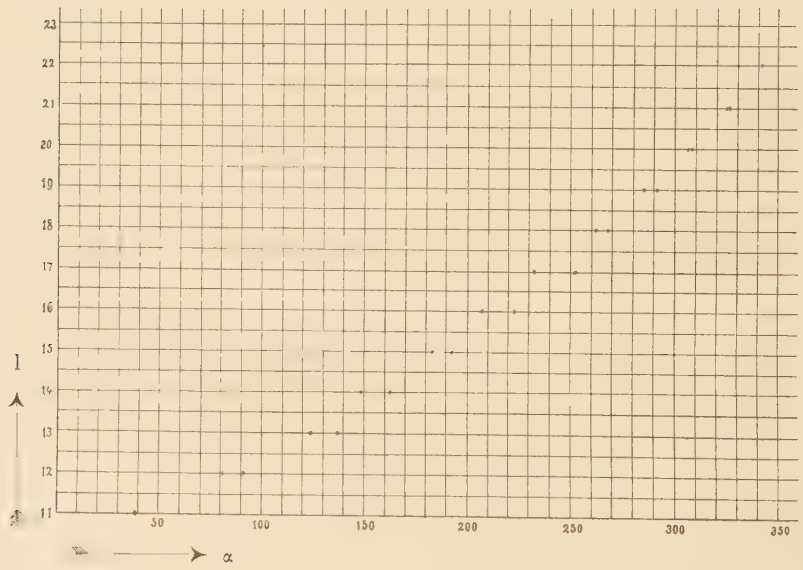
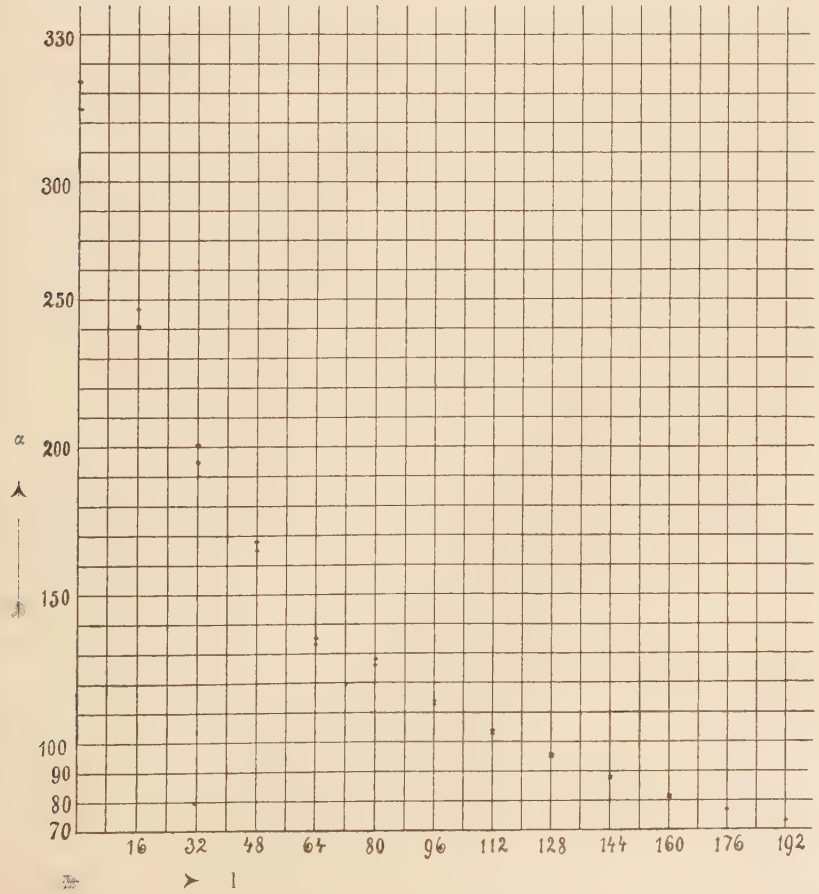


Tabelle 10.

	l	α_1	α_2	Differenz
a	0	324,0	315,0	9,0
b	16	247,5	241,0	6,5
c	32	200,0	195,0	5,0
d	48	168,0	165,0	3,0
e	64	145,0	143,3	1,7
f	80	128,5	126,3	2,2
g	96	114,0	113,0	1,0
h	112	104,0	103,0	1,0
i	128	95,0	94,7	0,3
k	144	88,0	87,5	0,5
l	160	82,0	82,0	0
m	176	77,0	77,0	0

Diese Beobachtungsreihe wurde mit dem grossen Magnet-



system angestellt. Die Magnetisierung war etwas schwächer, als die bei Tabelle 6. Die Werte l, α_1 und α_2 haben die Bedeutung wie vorhin. Es sind wieder die Werte für α_2 die kleineren, da sie ohne Compensationsfeld erhalten wurden.

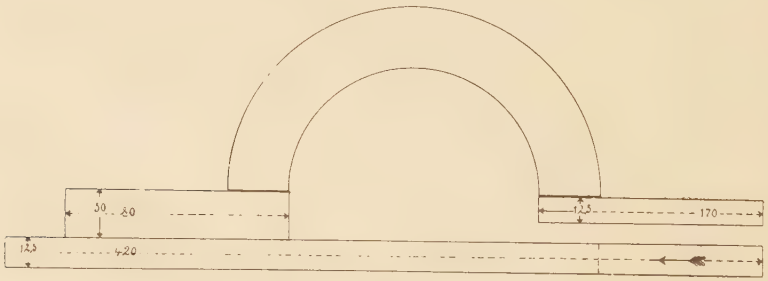
Diese drei Versuchsreihen liefern den Beweis für die Anwesenheit einer Hysteresis, die von R. H. Weber [1]) verneint wird.

Variation des Widerstandes durch Veränderung des Querschnittes.

Bei allen bis dahin gemachten Untersuchungen wurde die Änderung des magnetischen Widerstandes hervorgerufen durch Verbreiterung des Luftspaltes. Ebenso gut kann man den Widerstand variieren bei gleich bleibender Breite des Luftspaltes, wenn man die Grösse des Luftquerschnittes ändert. gemäss der Formel:

$$W = \frac{l}{\mu \cdot q}$$

Dieses erreichte ich dadurch, dass ich Polstücke herstellte, die durch Verschiebungen längs des Magneten die einander gegenüber stehenden Flächen der Grösse nach veränderlich machten, wie es schematisch nebenan gezeichnet ist.



An den einen Pol des p. 19 bezeichneten Magnethalbringes legte ich ein Weicheisenstück von den Dimensionen

[1]) R. H. Weber. Drude's Annalen 16. p. 186. 1905.

$12{,}5 \times 50 \times 170$ mm fest an, und zwar so, dass der innere Rand des Halbringes mit dem inneren Rand des Stückes abschloss. Und an den anderen Pol ein Stück des gleichen Materials von den Dimensionen $25 \times 50 \times 80$ mm, das ebenfalls mit dem inneren Rand des Halbringes mit seiner kleineren Fläche abschloss. An dem zweiten Polstück vorbei konnte eine Schiene aus dem gleichen Material von den Dimensionen $12{,}5 \times 50 \times 420$ Millimeter in Führungen gehend verschoben werden, dass sie dem ersten Polstück mit den Flächen 170×50 mm bis 26×50 mm gegenüber stand. Durch Anschläge waren diese Flächen genau festgelegt.

Tabelle 11.

	Querschnitt	α beob.	α berechn.	Differenz	Fehler in Proz.
a	5	454,0	454,0	0,0	0,0
b	6	446,0	444,5	+ 1,5	+ 0,3
c	7	437,0	435,4	+ 1,6	+ 0,4
d	8	428,0	426,6	+ 1,4	+ 0,3
e	9	419,0	418,2	+ 0,8	+ 0,2
f	10	411,0	410,1	+ 0,9	+ 0,2
g	11	404,0	402,3	+ 1,7	+ 0,4
h	12	397,0	395,0	+ 2,0	+ 0,5
i	13	387,0	387,6	— 0,6	— 0,1
k	14	381,0	880,7	+ 0,3	+ 0,1
l	15	374,0	374,0	+ 0,0	0,0
m	16	368,0	367,5	+ 0,5	+ 0,1

Die Werte für α beobachtet wurden gewonnen, indem ich eine der grossen Spulen aus den Feldern heraus fallen liess. Die Einheit des Querschnittes war 59 cm. Die Konstanten wurden gewonnen nach folgender Gleichung:

$$\mathfrak{H} \cdot q = \frac{\mathfrak{M}}{w_i + \frac{l}{q}}$$

Dies ergibt nach einiger Umformung:

$$\mathfrak{H} = \frac{\frac{\mathfrak{M}}{w_i}}{q + \frac{l}{w_i}}$$

Würde $w_i = 0$ sein, so ergäbe sich die Konstanz von $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{M}$, analog dem Accumulator. Setzt man in die Gleichung für

$$\frac{\mathfrak{M}}{w_i} = A \text{ und für } \frac{l}{w_i} = B,$$

so erhält man die Gleichung:

$$\mathfrak{H} = \frac{A}{q + B}.$$

Wurden die Konstanten dieser Gleichung aus den Beobachtungen a und l bestimmt, so ergaben sich:

$$A = 21201 \qquad B = 41{,}7.$$

Aus diesen wurden die andern Werte für α berechnet; sie waren mit den beobachteten gut übereinstimmend, da sie im Maximum nur 0,5 Prozent abwichen. Die Feldänderung betrug während der Untersuchung 24 Prozent. Bei a war die Feldstärke 173 absolute Einheiten.

Im Folgenden waren in den magnetischen Kreis noch 2 Eisenstücke eingeschaltet, die den Widerstand erhöhten. Auch war die Magnetisierung eine stärkere.

Tabelle 12.

	Querschnitt	α beob.	α berechn.	Differenz	Fehler in Proz.
a	5	457,0	457,0	0,0	0,0
b	6	450,0	447,7	+ 2,3	+ 0,5
c	7	442,0	437,8	+ 2,2	+ 0,5
d	8	433,0	430,4	+ 2,6	+ 0,6
e	9	425,0	422,2	+ 2,8	+ 0,6
f	10	417,0	414,2	+ 2,8	+ 0,7
g	11	407,0	406,1	+ 0.9	+ 0,2
h	12	400,0	399,1	+ 0,9	+ 0,2
i	13	393,0	392,0	+ 1,0	+ 0,2
k	14	386,0	385,2	+ 0,8	+ 0,2
l	15	379,0	379,0	0,0	0,0

Wie bei Tabelle 11 wurden die Konstanten bestimmt aus den Beobachtungen a und l. Sie ergaben:

$$A = 22073 \text{ und } B = 43{,}3.$$

Die daraus berechneten Werte für α stimmen mit den beobachteten wieder überein. Die grösste Abweichung betrug 0,7 Prozent. Die Feldstärke war bei a 177 absolute Einheiten.

Dass auch bei Veränderung des Querschnittes die Kraftlinienanzahl nicht konstant ist, zeigt folgende Versuchsreihe. Eine einzige Windung wurde in der neutralen Zone um den Magneten gelegt und mit dem Galvanometer leitend verbunden. Plötzliche Vergrösserungen der Querschnitte lieferten die Ausschläge nach

Tabelle 13.

Querschnittänderung	α
Von 5 bis 6	10
„ 5 „ 7	20
„ 5 „ 8	29
„ 5 „ 9	38
„ 5 „ 10	45
„ 5 „ 11	52
„ 5 „ 12	58
„ 5 „ 13	64
„ 5 „ 14	69
„ 5 „ 15	74

Es vermehrte sich demnach die Gesamtanzahl der Kraftlinien bei den Querschnittsvergrösserungen, obwohl für einen beliebigen Einheitsquerschnitt im Spalt dabei die Kraftlinienanzahl abnimmt nach Tabelle 11 und 12. Dass sie sich nicht nach der ersten Formel p. 29 änderte, beruht darauf, dass die Kraftliniendichte zwischen den Polflächen nicht überall die gleiche war, was ich durch eine Spule, die ich an verschiedenen Stellen des Spaltes herausfallen liess, feststellen konnte. Einen weiteren Beitrag zu der Abweichung lieferte der wenn auch nur geringe permanente Magnetismus der Weicheisenstücke.

Resultate.

Die Resultate der Beobachtungen sind etwa folgende:

1. Wenn mit der Widerstandsänderung im permanenten magnetischen Kreis Feldänderungen bis zu 170 Prozent verbunden sind, ist die magnetomotorische Kraft als konstant anzusehen.
2. Die Konstanz der magnetomotorischen Kraft gilt höchstwahrscheinlich auch noch für grössere Widerstandsänderungen.
3. Nach Feldänderungen, die durch Widerstandsänderungen hervorgerufen wurden, macht sich eine geringe Hysteresis bemerkbar.
4. Für permanente Magnete ist der Kraftlinienfluss nicht konstant.

Die vorliegende Arbeit wurde im physikalischen Institut der Universität Tübingen ausgeführt. Es sei mir gestattet, auch an dieser Stelle dem hochverehrten Leiter des Instituts, Herrn Professor Dr. F. Paschen, für die mannigfachen Unterstützungen herzlichst zu danken. Zu besonderem Danke bin ich Herrn Privatdozent Dr. R. Gans verpflichtet, dem ich die Anregung zu diesem Thema verdanke, und der mich bei dessen Bearbeitung mit seinem fördernden Rat in der liebenswürdigsten Weise unterstützt hat.